CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO COLONIA VICENTE GUERRERO (0220), ESTADO DE BAJA CALIFORNIA

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES 2
Antecedentes 2
1.1 Localización 2
1.2 Situación administrativa del acuífero 4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 5
3. FISIOGRAFÍA 7
3.1 Provincia fisiográfica 7
3.2 Clima 8
3.3 Hidrología superficial 9
3.4 Geomorfología 10
4. GEOLOGÍA 11
4.1 Estratigrafía 14
4.2 Geología estructural 19
4.3 Geología del subsuelo 20
5. HIDROGEOLOGÍA 21
5.1 Tipo de acuífero 21
5.2 Parámetros hidráulicos 22
5.3 Piezometría 22
5.4 Comportamiento hidráulico 23
5.4.1 Profundidad al nivel estático 23
5.4.2 Elevación del nivel estático 24
5.4.3 Evolución del nivel estático 25
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 26
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 27
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 27
7.1 Entradas 28
7.1.1 Recarga vertical (Rv) 28
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (agua dulce Ehd) 29
7.1.3Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (Ehs) 30
7.2 Salidas 31
7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 31
7.2.2 Bombeo (B) 31
7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S) 31
8. DISPONIBILIDAD 32
8.1 Recarga total media anual (R) 33
8.2 Descarga natural comprometida (DNC) 33
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 33
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 34
9. BIBLIOGRAFÍA 35

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la "NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales".

Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA. La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1 Localización

El acuífero Colonia Vicente Guerrero, definido con la clave 0220 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro- occidental del estado de Baja California, entre los paralelos 30° 43' y 30°58' de latitud norte y los meridianos 115° 18' y 116° 03' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,108 km^2.

Limita al norte con el acuífero San Telmo, al oriente con Valle Chico-San Pedro Mártir, al sureste con el acuífero San Simón, al sur con San Quintín y al oeste con Camalú, todos ellos pertenecientes al estado de Baja California; al suroeste su límite natural es el Océano Pacífico (figura 1).Geopolíticamente, el acuífero se localiza totalmente dentro del municipio de Ensenada.

Figura 1. Localización del acuífero

La poligonal simplificada que delimita el acuífero, se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0220 COLONIA VICENTE GUERRERO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	116	1	43.8	30	40	50.1	DEL 1AL 2 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
2	116	2	48.7	30	44	48.2	
3	116	0	23.7	30	46	12.9	
4	115	55	46.6	30	48	37.8	
5	115	50	3.8	30	52	12.2	
6	115	50	410	30	54	12.8	
7	115	49	0.4	30	54	54.7	
8	115	40	19.4	30	54	38.7	
9	115	38	115	30	53	54.5	
10	115	29	24.4	30	58	8.6	
11	115	26	15.4	30	57	47.8	
12	115	24	54.4	30	52	44.4	
13	115	22	47.2	30	52	9.9	
14	115	20	20.8	30	50	211	
15	115	18	35.3	30	46	32.6	
16	115	26	57.0	30	42	53.9	
17	115	29	119	30	44	40.9	
18	115	32	34.1	30	43	30.3	
19	115	36	4.3	30	43	16.4	
20	115	41	59.4	30	48	8.9	
21	115	45	58.2	30	45	20.0	
22	115	50	16.5	30	46	211	
23	115	52	14.0	30	43	57.2	
1	116	1	43.8	30	40	50.1	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Colonia Vicente Guerrero pertenece al Organismo de Cuenca I "Península de Baja California" y al Consejo de Cuenca Baja California, instalado el 7 de diciembre de 1999.

Su territorio completo se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones del "*Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Estado de Baja California*", publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de mayo de 1965; esta veda se clasifica como tipo III en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos de Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En la superficie del acuífero no se localiza ninguna unidad o Distrito de Riego. Los usuarios de aguas subterráneas se encuentran organizados en el Comité Técnico del Aguas Subterráneas (COTAS) Acuífero de la Colonia Vicente Guerrero, instalado el 6 de mayo de 1999. Su extremo oriental forma parte del Parque Nacional Sierras de San Pedro Mártir, decretado el 26 de abril de 1947.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado diversos estudios hidrogeológicos, geofísicos, hidrogeoquímicos y de otros tipos, algunos de cobertura regional. A continuación se mencionan los estudios más recientes e importantes:

RECONNAISSANCE GEOLOGY OF DE STATE OF BAJA CALIFORNIA, elaborado por Gordon Gastil, Richard P. Philips y Edwin C. Allison en 1975. Estructuralmente clasifica a Baja California en península oriental y central estable; litoral continental inestable y depresión del Golfo. Elabora un plano geológico a escala 1:250,000, que divide la geología histórica en los eventos prebatolítico y emplazamiento en rocas batolíticas, con cuatro zonas metamórficas.

GEOHIDROLOGÍA DEL VALLE DE VICENTE GUERRERO, B.C.N., elaborado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) en 1978. En este estudio se realizó un censo de aprovechamientos, se llevaron a cabo pruebas de bombeo para determinar los parámetros hidráulicos, determinaciones de la salinidad del agua y se elaboró el balance de aguas subterráneas. Concluye que la recarga del acuífero era de 12.3 hm^3 anuales, mientras que la extracción se estimó en 6.0 hm^3; la concentración de sólidos totales disueltos variaba de 800 a 1,000 mg/l.

RESUMEN EJECUTIVO DEL ACUÍFERO COLONIA VICENTE GUERRERO. Elaborado por la Gerencia Regional Península de Baja California de la Comisión Nacional del Agua en 1998. Describe las principales características del acuífero y establece que en 1994 se identificaron 350 aprovechamientos, de los cuales 139 se encontraban activos, con una capacidad instalada para extraer 2,374 lps (75.4 hm^3/año). Establece que la recarga media era de 19.5 hm^3/año, la extracción por bombeo de 15.2 hm^3/año, con descarga total de 21.4 hm^3/año, provocando una sobreexplotación de 1.9 hm^3/año. La concentración de sólidos totales disueltos variaba de 800 a 6,500 mg/l.

OPCIONES PARA EL MANEJO SUSTENTABLE DEL AGUA EN CAMALÚ, VICENTE GUERRERO, SAN QUINTÍN Y SAN SIMÓN. Elaborado por la Gerencia Regional Península de Baja California de la Comisión Nacional del Agua en 2003. Incluye información recopilada de estudios previos e indica que para el acuífero Colonia

Vicente Guerrero el área de explotación era de 25 km^2, de los cuales 3.7 km^2 contenían agua de mala calidad.
Menciona que la vulnerabilidad del acuífero es extrema y diseña la planeación para adecuar el desarrollo de la región de acuerdo a la disponibilidad de agua, para frenar la sobreexplotación, reducir la demanda y manejar la oferta.

PLAN DE MANEJO INTEGRADO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL ACUÍFERO DE LA COLONIA VICENTE GUERRERO, ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. Elaborado por la Universidad Autónoma de Baja California para la Comisión Nacional del Agua en el año 2007. El objetivo del trabajo fue proponer el plan de manejo para estabilizar el acuífero, reduciendo gradualmente la sobreexplotación, y con ello atenuar la degradación de la calidad del agua. El proyecto de estabilización que propone, incluye la construcción de plantas desalinizadoras; reducir la sobre concesión de derechos del agua inscritos en el REPDA, el establecimiento de una red de medición hidrológica, programar la optimización y uso eficiente del agua de uso agrícola y la explotación de aguas de origen marino.

ESTUDIO DE IMPACTO POR EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL AVANCE DE LA INTRUSIÓN MARINA DE LOS ACUÍFEROS COSTEROS SAN QUINTÍN, COLONIA VICENTE GUERRERO Y CAMALÚ, EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA, elaborado en 2011 por la Universidad Autónoma de Baja California para la Comisión Nacional del Agua. Este estudio tuvo como objetivo llevar a cabo el diagnóstico de la condición actual de los acuíferos, realizar un análisis histórico-estadístico de las variables relacionadas con el clima de la región, definir escenarios del nivel medio del mar y sus impactos, e integración de propuestas de mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS PARA ACTUALIZAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA DE 10 ACUÍFEROS, EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA, elaborado por Moro Ingeniería, S.C. en 2013 para la Comisión Nacional del Agua. Los acuíferos estudiados fueron Tijuana, Tecate, Las Palmas, Ojos Negros, Laguna Salada, Maneadero, La Trinidad, Camalú, San Quintín y San Simón. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, revisar el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

Incluyeron actividades de campo como el censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA LA REGLAMENTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS GUADALUPE Y COLONIA VICENTE GUERRERO, EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. Realizado en 2013 por Lesser y Asociados S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua. Entre sus objetivos destacan el conocimiento de la condición geohidrológica del acuífero, definir su modelo conceptual de funcionamiento, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular su recarga total media anual.

Con sus resultados se determinaron las causales de interés y de utilidad pública señaladas en la Ley de Aguas Nacionales, para establecer la medida regulatoria que proceda, así como identificar y proponer medidas correctivas y de operación. Este trabajo constituye la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

La superficie cubierta por el acuífero pertenece a la Provincia Fisiográfica Baja California (Raisz, 1964), Subprovincia Sierra de Juárez. De acuerdo a la clasificación de las provincias fisiográficas realizada por INEGI (1997), la superficie del acuífero se encuentra ubicada dentro de la Provincia Fisiográfica Península de Baja California, Subprovincia Sierras de Baja California Norte, la cual está representada en todo su conjunto por la provincia geológica Batolito de Juárez-San Pedro Mártir, de origen intrusivo, edad mesozoica y evolución geológica de raíz de arco volcánico, asociada a la subducción de la extinta placa tectónica de Farallón (Ortega *et al*., 1992).La mejor exposición de esta subprovincia está representada por las sierras Juárez, San Felipe y San Pedro Mártir. Esta última, con una elevación máxima de 3,078 msnm en el cerro Pico del Diablo.

Se reconoce una gran variedad de tipos litológicos, estructuras y geoformas del relieve. Esta provincia está caracterizada por la presencia de tres cinturones pre-terciarios que corren a lo largo de la península.

3.2 Clima

Con base en la clasificación y distribución de climas del INEGI (1998) y de acuerdo con los criterios de la clasificación de Köppen modificados para las condiciones de la República Mexicana por E. García (1964), se determina que en la porción baja de la cuenca en la que se aloja el acuífero predominan los climas muy áridos o secos BW, con lluvias en verano e invierno y escasas todo el año; se presentan tres variables: seco-templado (BSks), muy seco-semicálido (BWh) y muy seco-templado (BWk).

El clima muy seco templado se presenta en la mayor parte de la planicie costera, el clima seco templado se registra en el extremo nororiental; y el tipo muy seco semicálido en la porción central del acuífero, en una franja irregular que atraviesa toda el área en sentido NW-SE. En las regiones topográficamente más altas se presenta el clima tipo C(E)s(x'), semifrío-subhúmedo con lluvias en invierno

Para la determinación de las variables climatológicas, se utilizó la información de 3 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Colonia Guerrero, Mesa de San Jacinto y Ejido Zarahemita, cuyo periodo de registro no comprende años recientes porque están suspendidas.

La temperatura media anual en la región es muy variable desde la línea de costa hacia el oriente. En la línea de costa, la media anual es de 16°C y disminuye paulatinamente en dirección al oriente, conforme se eleva la topografía del terreno; en las partes más altas de la Sierra de San Pedro Mártir se registra un valor medio anual de 6°C.

La precipitación media anual en la zona de explotación del acuífero es menor de 200 mm y se incrementa hacia las zonas altas de la Sierra de San Pedro Mártir, donde alcanza un valor de 500 mm.

Con base en la información de INEGI se determinaron valores promedio anuales de temperatura y precipitación, para la región centro y costera, de **16.5 °C y 175.3 mm**,

respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, su valor promedio anual es de **1480 mm**.

El régimen de lluvias se registra principalmente de noviembre a abril; el máximo valor se presenta en enero y junio es el mes más seco. Las temperaturas mínimas se registran entre los meses de diciembre a febrero.

La región se caracteriza por presentar periodos prolongados de sequía, que eventualmente son interrumpidos por la incidencia de lluvias torrenciales.

Aunque el valor de la precipitación pluvial media anual es muy bajo, las lluvias de temporada y la presencia ocasional de lluvias extraordinarias, tienen un efecto importante sobre la recarga al acuífero.

Las condiciones de aridez, causadas por las bajas precipitaciones pluviales, son agravadas por la presencia de sequías extremas que ocasionan una disminución de los escurrimientos superficiales y del almacenamiento.

3.3 Hidrología superficial

La zona en la que se ubica el acuífero pertenece a la Región Hidrológica No. 1, Baja California Noroeste (Ensenada), Subregión Hidrológica Río Tijuana, en la Cuenca Arroyo La Ánimas – Arroyo Santo Domingo (B), en la subcuenca Arroyo Santo Domingo (A) y forma parte de la vertiente del Océano Pacífico.

El acuífero se aloja en la Cuenca Hidrográfica del Arroyo Santo Domingo, integrada principalmente por los afluentes de la margen derecha del Arroyo Santo Domingo, denominados Cañada Arroyo Hondo, Cañada Portezuelo, Misión de Santo Domingo y La Garrocha. En la porción central de la cuenca se ubican los Arroyos Valladares y Santa Cruz, que se integran al Arroyo Santo Domingo, y en su margen derecha se identifica el Arroyo San Antonio de Murillos.

Debido a las características geológicas y tectónicas del área, la red de drenaje de los escurrimientos presenta un patrón paralelo y dendrítico. Todos estos escurrimientos tributarios convergen en el Arroyo de Santo Domingo que constituye el afluente de mayor importancia y extensión en el acuífero. Con esta denominación, transita desde su origen en la Sierra de San Pedro Mártir, hasta su desembocadura al Océano Pacífico,

escurre en dirección este-oeste y tiene una superficie de cuenca de captación de 1,218 km^2.

3.4 Geomorfología

Las condiciones climáticas del área, la escasez de lluvia, el incipiente y poco desarrollo del drenaje y la cercanía con el mar, han contribuido a que el área se encuentre en una etapa de juventud tardía del ciclo geomorfológico. La región se encuentra conformada por una llanura costera rodeada de mesetas y sierras altas hacia el este. En la superficie del acuífero se identifican tres geoformas.

Valle o Llanura Costera. Cubre aproximadamente el 5 % de la superficie total del acuífero, es un valle homogéneo de forma alargada con orientación NW-SE inclinado hacia el SW.
Su pendiente no excede los 20° y se encuentra a una altitud comprendida entre los 0 y 70 msnm. Está constituido por depósitos granulares de textura y tamaño variable; su corriente principal es el arroyo Santo Domingo, ubicado en la porción central del acuífero, el cual escurre en dirección preferencial este-oeste y constituye la principal zona de recarga al acuífero.

Lomeríos y Mesetas. Se presentan en una franja orientada al NW, de manera paralela a la zona de sierras. Están constituidas por un conglomerado heterogéneo, formado por fragmentos de granitos, basaltos y calizas metamorfizadas, cuyo espesor supera los 50 m. Su elevación varía entre 70 y 200 msnm y en general presentan un sistema de drenaje de tipo paralelo, debido a que las mesetas se encuentran disectadas por cañones y cañadas.

Las unidades que las conforman tienen permeabilidad media a baja debido a que su composición litológica incluye arenas arcillosas, así como depósitos de talud y abanicos aluviales, localizados al pie de las montañas.

Sierras y Cerros. Se ubican en la porción oriental del acuífero, cubriendo la mayor parte de su superficie, con una orientación hacia el NW. Las zonas topográficamente más altas forman parte de la Sierra San Pedro Mártir, que representa el límite oriental del acuífero. Están conformadas por rocas ígneas intrusivas como dioritas, tonalitas y granodioritas, así como metamórficas, en las que el patrón de fallas y fracturas permite la infiltración de las lluvias. El drenaje que predomina es de tipo subparalelo y en

menor proporción dendrítico. Su altura varía de 200 hasta a 2,600 msnm en la Sierra de San Pedro Mártir.

4. GEOLOGÍA

Desde el punto de vista geológico, la región se ubica en el Batolito de San Pedro Mártir (Ortega, et. al. 1992), de edad Mesozoica, de origen plutónico y de un ambiente de raíz de arco. Este intrusivo, conformado por tonalitas y granodioritas, se desarrolló del Cretácico al Cenozoico tardío y tiene una extensión de más de 400 km^2.

La intrusión causó metamorfismo a las rocas prebatolíticas, transformándolas a gneis y esquisto. El fallamiento fuertemente escalonado que presenta la península de Baja California está relacionado con el desarrollo de los sistemas transformantes que dominan la tectónica regional. En el área del acuífero afloran rocas sedimentarias, ígneas y metasedimentarias cuyo registro estratigráfico varía del Paleozoico al Reciente (figura 2).

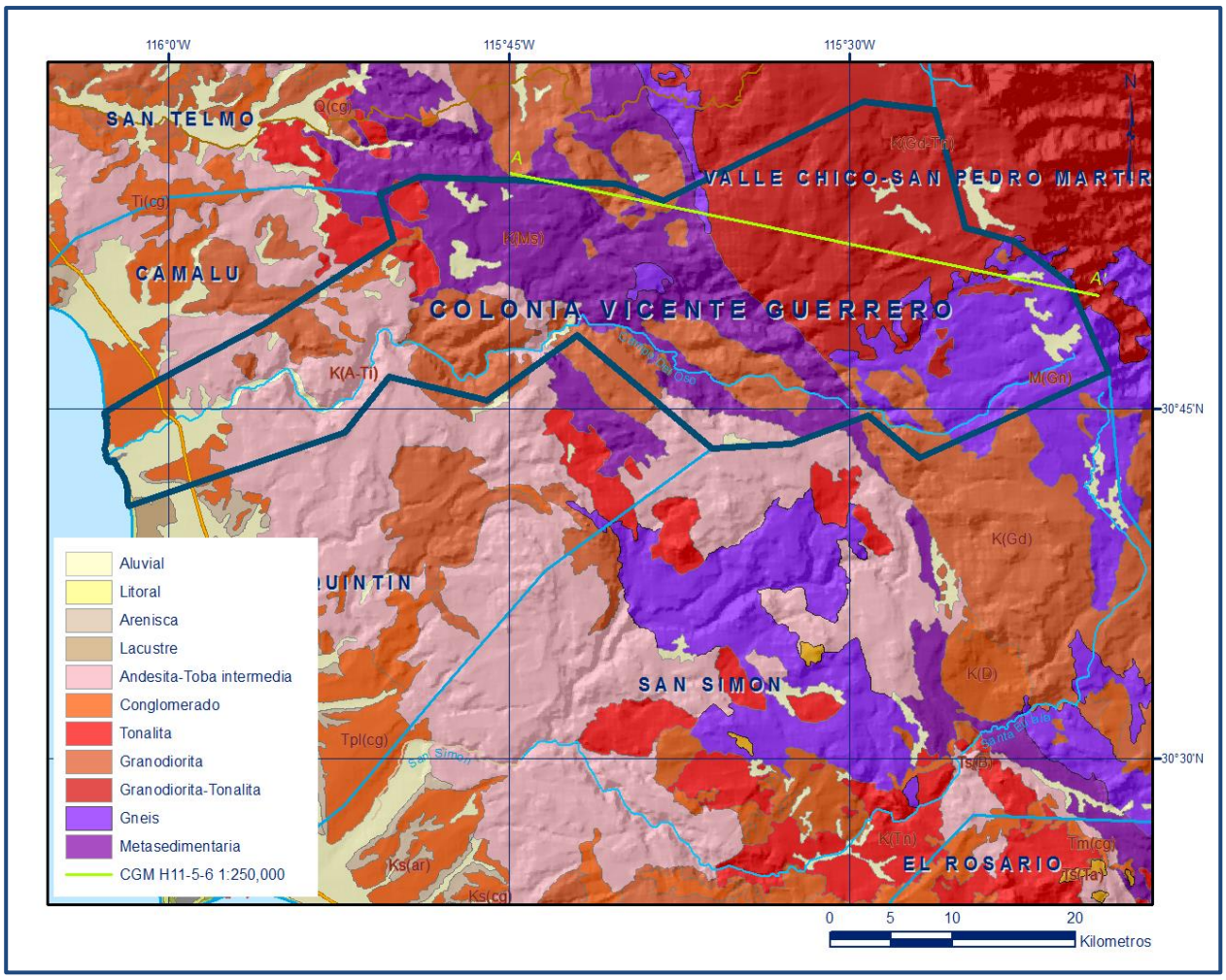


Figura 2. Geología general del acuífero

La geología regional es el reflejo de una zonificación litológica-estructural que se manifiesta a lo largo de toda la península de Baja California. En el territorio del estado de Baja California se encuentra expuesta una secuencia estratigráfica cuyo rango geocronológico varía desde el Paleozoico hasta el Reciente.

La distribución de las diferentes unidades litológicas se puede definir según tres cinturones pre-terciarios que presentan características petrográficas, estructurales y estratigráficas claramente diferenciables. Estos cinturones se encuentran cubiertos de manera independiente por depósitos volcánicos y sedimentarios del Terciario y Cuaternario; su distribución de oeste a este es la siguiente:

El primer cinturón, ubicado en el extremo occidental de la península, está representado por una secuencia de sedimentos marinos y continentales del Cretácico

Superior, poco consolidados y sin fuertes deformaciones tectónicas. Esta secuencia fue definida formalmente por Beal (1948) como Formación Rosario y consiste de areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados, que contienen fauna marina y huesos de saurios.

El siguiente cinturón está conformado por secuencias de rocas volcánicas, vulcanoclásticas y sedimentarias cuya edad asignada corresponde al Cretácico Inferior. La secuencia superior y de mayor distribución fue definida originalmente por Santillán y Barrera (1930) como Formación Alisitos, que está constituida principalmente por rocas piroclásticas y lavas de composición dacítica-andesítica, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano y Albiano, así como rocas clásticas derivadas de rocas volcánicas.

En algunas localidades, cubre discordantemente a rocas volcánicas y sedimentarias de edad triásica y jurásica; se encuentra deformada, parcialmente metamorfizada y afectada por numerosas fallas y por el emplazamiento de cuerpos intrusivos graníticos del Cretácico. Subyace discordantemente a la Formación Rosario y se extiende persistentemente a lo largo de toda la porción norte de la península. El tercer cinturón, ubicado en el borde oriental de la porción norte de la península, está constituido por rocas intrusivas y metamórficas producto del metamorfismo regional de rocas sedimentarias. A esta franja pertenecen los batolitos mesozoicos (tonalitas-granodioritas y granitos) y rocas prebatolíticas anteriores a la Formación Alisitos, cuya edad no ha sido aún bien definida.

Las secuencias metamórficas prebatolíticas asociadas a este cinturón presentan diferentes facies metamórficas y su edad es motivo de discusión. Predominan los esquistos, gneises, cuarcitas y pizarras. La historia cenozoica está caracterizada por la acumulación de gruesos espesores de sedimentos continentales que afloran en diversas localidades, por el desarrollo de depósitos marinos, sobre todo en el borde occidental de la península, y por una importante actividad volcánica que cubre parcialmente los cinturones mesozoicos descritos.

Durante el Plioceno y Pleistoceno se acumularon depósitos marinos en una serie de terrazas que alcanzan una altura de hasta 500 m, asociadas a cambios glaciales del nivel del mar (Gastil et al., op. cit.), que se desarrollaron en el marco de una serie de levantamientos y basculamientos de las zonas costeras durante el Plioceno-

Cuaternario (Ortlieb, 1978). Tierra adentro se presentan depósitos aluviales, eólicos y lacustres, cuya acumulación ocurre en la actualidad.

Regionalmente la zona está representada por un marco geológico que ha sido definido por la sucesión de eventos tectónicos relacionados con la evolución del borde occidental de Norteamérica, así como con los fenómenos que contribuyeron a la separación de la Península de Baja California. El panorama morfoestructural que presenta hoy la región ha sido establecido por eventos geológicos que datan desde la Era Paleozoica y culminan con la apertura del Golfo de California, dominado por un ambiente de "Rifting", con fallamiento transforme. Las unidades litológicas que afloran pertenecen a dos terrenos tectonoestratigráficos: El Terreno Cortés y el Terreno Alisitos.

El primero se distribuye en la porción oriental y el segundo en la región occidental. Las rocas en general se encuentran moderadamente fracturadas y cizalladas.

4.1 Estratigrafía

En la porción occidental del acuífero afloran rocas ígneas intrusivas como granitos y granodioritas, consideradas parte de la Franja Batolítica Transpeninsular, a la cual se le atribuye una edad Cretácico Superior. Sobre estas rocas sobreyace una serie de derrames de composición basáltica y un grupo de rocas andesíticas.

A continuación, se hace una breve descripción de las unidades geológicas que afloran en el área, de la más antigua a la más reciente:

PALEOZOICO

Formaciones Zamora y El Volcán

Constituyen el basamento de la región y forman parte del Terreno Cortés. Están constituidas por rocas metasedimentarias conformadas por esquistos, gneises, pizarras, filitas, mármol, cuarcitas, calizas y hornfels, que presentan grados de metamorfismo en facies de esquistos verdes a facies de anfibolitas.

La Formación El Volcán sobreyace concordantemente a la Formación Zamora y ambas son correlacionables con la secuencia paleozoica que aflora en la Sierra Las Pintas, asignada al Carbonífero por la presencia de crinoides, corales, bivalvos y braquiópodos.

CRETÁCICO

Formación Alisitos (Cretácico Inferior)

Fue definida formalmente por Santillán y Barrera (1930), al referirse a "una secuencia de 200 m de lutitas y areniscas metamorfoseadas del Cretácico Inferior que aflora en el Rancho Alisitos en el Valle de Santo Tomás, en el Estado de Baja California. Esta unidad se extiende en una franja orientada NW-SE por espacio de 500 km de lago y 50 km de ancho (Almazán, 1988), a lo largo de la cual, debido a su naturaleza, presenta frecuentes variaciones horizontales".

Consta de nueve miembros litológicos: dos inferiores de composición volcánica, tres intermedios de rocas sedimentarias con fauna fósil del Albiano Medio o Aptiano y cuatro superiores de clásticos gruesos de origen volcánico que se localizan al este-noreste de El Rosario, Baja California que se considera la sección más completa (López, R.,1980).

Los miembros volcánicos constan de rocas piroclásticas y lávicas de composición dacítico-andesítica. De acuerdo con Rangin (1978) en: INEGI (1984), la Formación Alisitos constituye un cinturón volcánico-sedimentario desarrollado en la parte noroccidental del país en forma paralela con otro en Sonora, evolucionando ambos sobre corteza continental.

Estos cinturones han sido relacionados a la subducción y fusión parcial asociadas a uno o más límites convergentes desarrollados en el noroeste de México durante la apertura del Océano Atlántico y el movimiento de Norteamérica hacia el noroeste.

Está constituida principalmente por rocas piroclásticas y lavas de composición dacítica-andesítica, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano y Albiano, así como rocas clásticas derivadas de rocas volcánicas. En algunas localidades, cubre discordantemente a rocas volcánicas y sedimentarias de edad triásica y jurásica; se encuentra deformada, parcialmente metamorfizada en facies de esquistos verdes, afectada por numerosas fallas y por el emplazamiento de cuerpos intrusivos graníticos del Cretácico. Subyace discordantemente a la Formación Rosario y se extiende persistentemente a lo largo de toda la porción norte de la península. Aflora coronando a las rocas de edad Triásico-Jurásico, en forma discordante.

Formación Rosario (Cretácico Superior)

Su nombre fue designado formalmente por Beal en 1948 (en López, R., 1985), para referirse a un afloramiento de areniscas de color café y arcillas de color oscuro, con lentes de conglomerado, asignándole una edad Campaniano-Maestrichtiano.

Su localidad tipo se encuentra en el Arroyo Rosario, ubicado al noreste del poblado del mismo nombre. Está formada por paquetes de lutitas, areniscas y conglomerados con presencia de fósiles de origen continental y marino; se presenta poco consolidada y con escasas evidencias de tectonismo. Se encuentra descansando en discordancia angular sobre la Formación Alisitos, formando el tercer cinturón (postbatolítico) de los terrenos pre-terciarios de Baja California Norte, cuyo límite oriental es la denominada línea "Santillán-Barrera" que representa una línea de costa fluctuante que marca el límite de dos eventos tectónicos.

De acuerdo con Yeo (1984), la Formación Rosario se divide en tres miembros litoestratigráficamente distintos, cada uno de los cuales corresponde a una fase diferente en el cambio del nivel del mar. Estas unidades son (de la base a la cima): (a) miembro arenoso inferior, (b) miembro lodolítico medio y (c) miembro conglomerático-arenoso superior. Los tres presentan marcados cambios en facies tanto en extensión (de norte a sur y de este a oeste) como en la vertical (en sentido estratigráfico).

La transición vertical de estas facies corresponde a variaciones temporales del nivel del mar. En términos geográficos los cambios de facies más grandes se presentaban de este a oeste, que concuerdan con el trend de la línea de costa hacia la cuenca para el Cretácico Tardío.

Esta formación cubre, en discordancia angular, a rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias más antiguas; subyace a rocas volcánicas del Cuaternario y a sedimentos continentales y marinos del Neógeno y Cuaternario. Las determinaciones paleontológicas la ubican estratigráficamente en los pisos Campaniano y Maestrichtiano. Su espesor máximo es de 750 m.

Los afloramientos de esta unidad en la región se distribuyen a lo largo de la vertiente occidental de la Sierra San Miguel, configurando una serie de mesas de escasa

elevación que se encuentran coronadas por los sedimentos marinos terciarios, sus exposiciones son muy angostas e irregulares y presentan una orientación NW-SE.

TERCIARIO

Rocas ígneas Intrusivas

Las rocas plutónicas que conforman los batolitos varían en composición mineralógica desde tonalitas hasta granodioritas y granitos; sin embargo, en algunas localidades se han cartografiado pequeños intrusivos de diorita y gabro.

Los cuerpos plutónicos varían en edad de W a E, desde cretácicos en Baja California hasta cenozoicos en Chihuahua (Gastil y Krummenacher, 1978; Silver y Anderson, 1978).

La mayor parte de estos emplazamientos batolíticos ocurrieron durante y después de los depósitos y emisiones magmáticas que dieron origen a la Formación Alisitos. Se considera que las rocas pertenecen al cinturón orogénico denominado Cordillera Norteamericana, que se estableció durante el Mesozoico.

Esta unidad se presenta intrusionando a la secuencia vulcanosedimentaria de la Formación Alisitos y junto con dicha unidad, conforman las partes más elevadas de la región. Sus afloramientos muestran una estructura masiva, están fuertemente fracturadas y su intemperismo es en forma de bloques.

Neógeno Marino (Plioceno)

Se adoptó este nombre para designar a los depósitos de sedimentos que se distribuyen a lo largo de la margen occidental de la Sierra San Miguel que conforman las mesetas. Está constituido por areniscas y conglomerados, cuyos fragmentos fueron derivados de rocas ígneas y sedimentarias más antiguas que conforman las sierras ubicadas al este; presentan estructura masiva, con un grado bajo de fracturamiento.

Su espesor estimado difícilmente supera los 50 m. Según Gastil (1975) estos materiales se depositaron en la delgada franja costera que se extiende desde la Ciudad de Los Ángeles hasta los 28° de latitud norte, quedando incluidos en esta franja los sedimentos existentes en la zona de Colonia Vicente Guerrero.

Los depósitos marinos dieron origen a la formación de terrazas que actualmente pueden estar aflorando algunos kilómetros tierra adentro de la península y corresponde con lo que Heim (1922, en Gastil op.cit.) denominó Formación Salada.

Neógeno Continental (Plioceno)

Con este nombre se agruparon los depósitos de talud que se distribuyen sobre las unidades preterciarias que conforman las zonas de topografía elevada.

Son materiales granulares producto de la denudación de rocas preexistentes que se encuentran consolidados, formando lomeríos sobre los flancos y base de las sierras.

Están conformados por conglomerados de rocas ígneas, cuyos fragmentos se encuentran soportados por una matriz areno-arcillosa, presentan estructura masiva y al intemperizarse tienden a formar bloques, su fracturamiento es escaso y presentan buena compactación.

La edad de estos depósitos fue determinada por Gastil (op. cit.) con base en su relación estratigráfica con los depósitos del Plioceno marino, por lo que les asignó esta misma edad.

En el área de estudio se presentan sobreyaciendo discordantemente a los estratos de la Formación Alisitos y a las rocas intrusivas graníticas que conforman la Sierra de San Miguel.

CUATERNARIO

Pleistoceno Marino

Gastil (1975) encontró depósitos de origen marino en la costa occidental del estado de Baja California. La unidad fue estudiada en 1944 por Hertlein (en Gastil, op. cit.), reportando, como principal característica, un paquete de areniscas y conglomerados con alteraciones ferruginosas de color rojo, intercalado con areniscas fosilíferas y coquinas. Al sur de Rosarito, los fragmentos mayores están bien redondeados y son del tamaño de guijarros, soportados por una matriz arenosa poco consolidada. En la planicie costera está cubierto por los materiales aluviales recientes o conformando pequeñas mesetas.

Depósitos recientes

Con este término se denomina a los depósitos más jóvenes que se distribuyen sobre las zonas topográficamente bajas; están representados por aluviones, depósitos de origen eólico, sedimentos lagunares, depósitos de dunas, depósitos de talud (bajo las mesetas) así como los depósitos fluviales sobre el cauce de los arroyos. Conforman el acuífero aluvial que actualmente se encuentra en explotación.

Los depósitos de origen aluvial están compuestos por materiales producto de la denudación de rocas pre-existentes. Se encuentran distribuidos en zonas de pie de monte y en los lechos de cauces de ríos, arroyos y zonas topográficamente bajas, formando en ocasiones abanicos aluviales.

Están constituidos principalmente por intercalaciones de gravas y arenas con horizontes de arcilla y limo, generalmente el material está mal clasificado, no consolidado o con escasa compactación. Se encuentran distribuidos por toda el área cubriendo a las rocas más antiguas por medio de discordancias angulares y litológicas. De acuerdo con los cortes litológicos de pozos, su espesor varía de 20 a 80 m. Los depósitos eólicos conforman dunas en la zona costera o en zonas topográficamente más bajas, hacia la bahía San Ramón. Están constituidos por granos de arena cuarzofeldespática, bien clasificados, subredondeados y de tamaño medio a grueso, frecuentemente con estratificación cruzada, no consolidados, de espesor menor a 20 m. Los depósitos lacustres se localizan en depresiones lagunares ubicadas en la zona cercana a la costa.

Están conformados por arenas, limos y arcillas que frecuentemente contienen restos de ostrácodos; se presentan en el extremo occidental del área definiendo una franja irregular, interrumpida por afloramientos del cuaternario marino.

4.2 Geología estructural

La característica estructural más importante son las grandes fallas regionales de rumbo NW-SE, truncadas por fallas NE-SW. Esta orientación es típica en la región y es atribuida a un régimen distensivo. Los principales eventos tectónicos que han afectado a la región iniciaron en el Paleozoico, cuando la margen del cratón de Norteamérica se situaba en la actual Península de Baja California, época durante la cual se desarrolló una tectónica pasiva que originó una sedimentación estable.

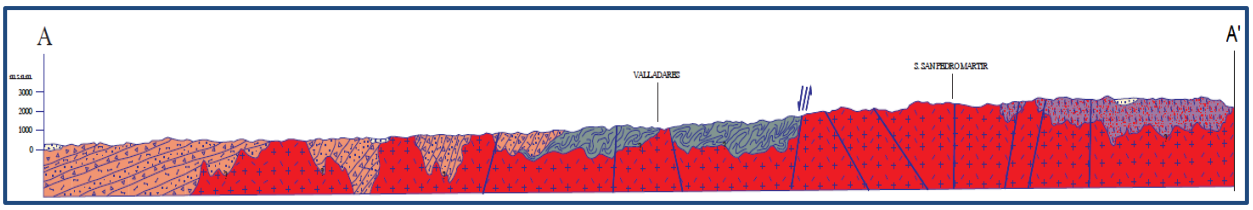
Durante el Cretácico Inferior se depositaron las rocas del Grupo Alisitos en un ambiente de arco insular. La tectónica compresiva de acreción está evidenciada en el flanco occidental de la Sierra San Pedro Mártir, donde existen cabalgaduras de rumbo general NW-SE contemporáneas al desarrollo de foliación en los granitos, dioritas y sedimentos del Grupo Alisitos del Cretácico Inferior. Este evento se desarrolló en el Cretácico Superior-Terciario Inferior inmediatamente anterior al emplazamiento del batolito peninsular.

Durante el Cretácico Superior se manifiesta una relativa calma tectónica que permite en el sector septentrional de la Península (entre Ensenada y San Quintín) el movimiento transgresivo del mar sobre los terrenos afectados por las intrusiones, permitiendo el depósito de la Formación Rosario, la cual fue afectada por una etapa distensiva que modeló la región en cuencas y pilares.

Durante el Mioceno Medio y el Plioceno Temprano ocurre un cambio en la configuración del límite entre la placa Pacífica y la Norteamericana, involucrando diversos procesos tectonomagmáticos en una amplia zona de la margen continental del Norteamérica, ocasionados por el cese de la subducción de la placa Farallón-Guadalupe, ubicada al oeste de Baja California y por la migración hacia el sur de la placa Rivera, originando a la postre la apertura del Golfo de California (Carta Geológico-Minera H11-5-6 “Lázaro Cárdenas”, escala 1:250,000 SGM, 2000).

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la interpretación conjunta de la geología superficial y del subsuelo, apoyada con la información geofísica y cortes litológicos de pozos, es posible determinar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por depósitos clásticos de origen aluvial, fluvial y eólicos de granulometría variada y conglomerados, depositados en los cauces de los arroyos y en la planicie costera; en tanto que la porción inferior se aloja en rocas volcánicas, sedimentarias y vulcanoclásticas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración (figura 3). Las fronteras y el basamento hidrogeológico están representados por las mismas rocas volcánicas y vulcanosedimentarias (Formación Alisitos) cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y la alteración; así como por las rocas intrusivas y metasedimentarias. El espesor de los depósitos clásticos es de 20 a 80 m, en tanto que el medio fracturado puede alcanzar algunas decenas de metros.



Fuente: Carta Geológico-Minera, Lázaro Cárdenas H11-5-6. Escala: 1:250 000

Figura 3. Sección geológica

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

La información de los cortes litológicos de pozos, los sondeos geofísicos y la información de la geología superficial, permiten establecer que el acuífero es de **tipo libre**, heterogéneo y anisotrópico, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la existencia de sedimentos arcillosos.

Está integrado, en su porción superior por un medio granular constituido por sedimentos clásticos de granulometría variada, conglomerados y depósitos eólicos; en su porción inferior por rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración. De acuerdo con su permeabilidad, es posible agrupar las distintas litologías en las unidades hidrogeológicas que a continuación se describen, las cuales conforman el medio poroso o granular y el medio fracturado por el que se desplaza el agua subterránea:

I) Depósitos granulares no consolidados de permeabilidad media a alta. Están constituidos por depósitos clásticos no consolidados del Terciario y Cuaternario, que rellenan la porción superior del valle y están compuestos por una gran diversidad de material granular, aluvial, fluvial y eólico; así como las areniscas y conglomerados de la Formación Rosario.

II) Derrames volcánicos, rocas sedimentarias y depósitos vulcanosedimentarios de permeabilidad media a baja. Dentro de esta unidad se considera la secuencia volcánica y vulcanosedimentaria del Cretácico Inferior y los derrames de basaltos cuaternarios. Su interés hidrogeológico se restringe a las zonas en las que sus afloramientos presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. En general funcionan como barreras al flujo subterráneo y basamento hidrogeológico.

III) Rocas ígneas y metamórficas de baja permeabilidad. Esta unidad está integrada por los cuerpos intrusivos que afloran en la porción oriental del acuífero, así como las secuencias metasedimentarias constituidas por filitas, esquistos, pizarras y gneises.

Son materiales muy compactos, de baja conductividad hidráulica, que funcionan como basamento regional del acuífero y fronteras al flujo del agua subterránea; sin embargo, localmente el fracturamiento puede incrementar su permeabilidad. El movimiento del agua subterránea en el medio granular está controlado por las variaciones de permeabilidad de los diferentes depósitos, mientras que en el medio fracturado su trayectoria depende del patrón de fracturas y fallas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2013, se ejecutaron 4 pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, que contaron con pozo de observación. De su interpretación por métodos analíticos convencionales se determina que los valores de transmisividad varían de **2.5 x10^{-5} a 32.0 x10^{-3} m^2/s**, en tanto que los valores de conductividad hidráulica varían de **5.0 x10^{-7} a 6.4 x10^{-4} m/s (0.04 a 55.3 m/d).**

Los valores más altos se presentan en los depósitos granulares del cauce del cauce del Arroyo San Domingo y los menores en la planicie costera, asociados a depósitos de granulometría fina. En cuanto a los valores del coeficiente de almacenamiento, los valores obtenidos varían de 0.00001 a 0.004.

De la interpretación de las pruebas de bombeo por el método de Rathod and Rushton realizadas en estudios previos, se obtuvieron coeficientes de almacenamiento que varían de 0.005 a 0.01 y el almacenamiento específico entre 0.1 y 0.25

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, existe información para diferentes años; para fines del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 2008-2013.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en 2013 varía desde algunos metros hasta 35 m, incrementándose por efecto de la topografía desde la zona próxima a la costa hacia tierra adentro, a lo largo del cauce del arroyo Santo Domingo.

Los valores más someros, menores de 5 m, se presentan en la porción costera del valle, mientras que los más profundos se registran en la región oriental, dentro del cañón que forma dicho arroyo (figura 4).

La variación de la profundidad del nivel estático no representa de forma directa la sobreexplotación a la que está sometido el acuífero, debido a que la intrusión de agua salobre procedente del mar reemplaza el agua dulce que se está extrayendo.

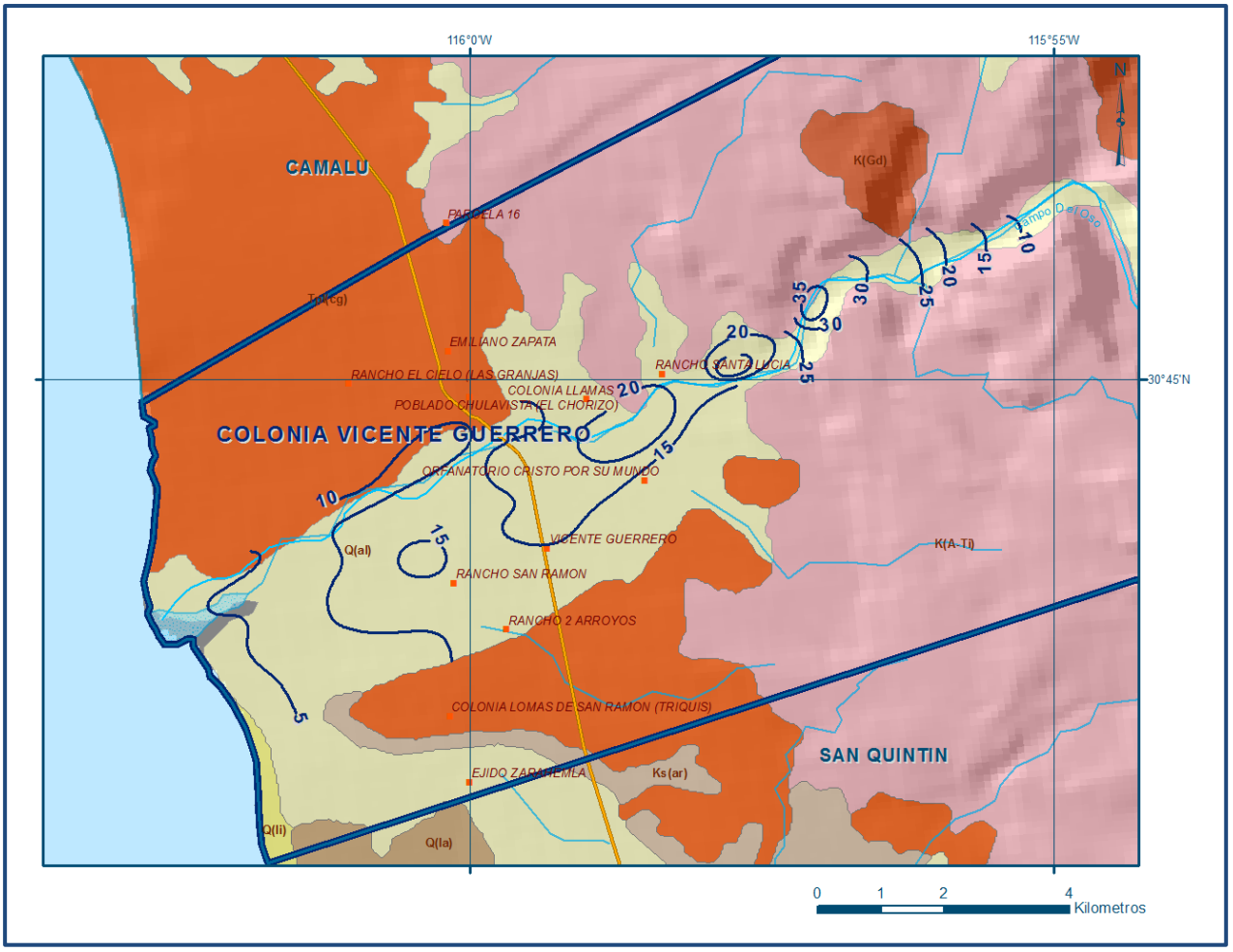


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2013 muestra que en la zona costera se registran valores bajo del nivel medio del mar (mbnm) que provocan la inversión del gradiente hidráulico tierra adentro y la intrusión marina, varían de 2 mbnm en la toda la porción costera, aumentando por efecto topográfico, al igual que la profundidad, hacia las elevaciones que representan los límites norte y sur del acuífero y aguas arriba a lo largo del cañón del arroyo Santo Domingo, hasta 55 msnm.

Dentro del cañón se han formado dos conos de abatimiento, definidos por las curvas de elevación 10 y 0 msnm, ocasionados por la extracción para abastecimiento de agua potable de San Quintín (figura 5).

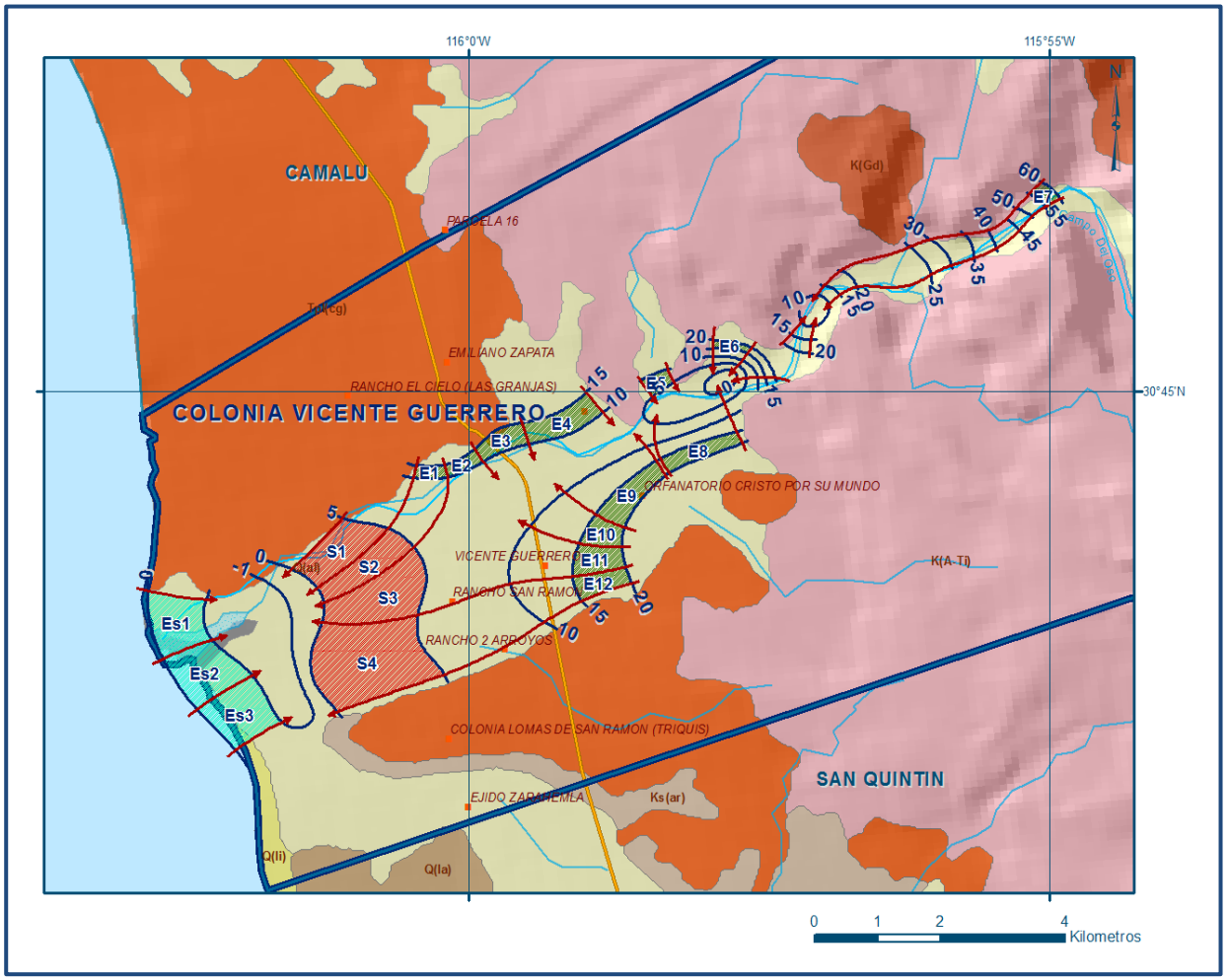


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático para el periodo 2008-2013, en la mayor parte del área de explotación se registraron abatimientos que varían de 1 a 5 m, es decir, de 0.2 a 1.0 m anuales. Los mayores se registran en las zonas donde se extrae agua para abastecimiento público-urbano. La extracción intensiva y de manera local, ha ocasionado intrusión marina que en la franja costera se muestra como recuperaciones del nivel del agua subterránea; en este caso, de agua salobre (figura 6).

Los valores de recuperación y de abatimiento tienden a anularse y como consecuencia el abatimiento medio anual es prácticamente imperceptible, situación que puede interpretarse como una condición de equilibrio hidrogeológico, que en realidad es consecuencia de la intrusión marina, la cual al inducir el ingreso de agua salobre compensa los abatimientos.

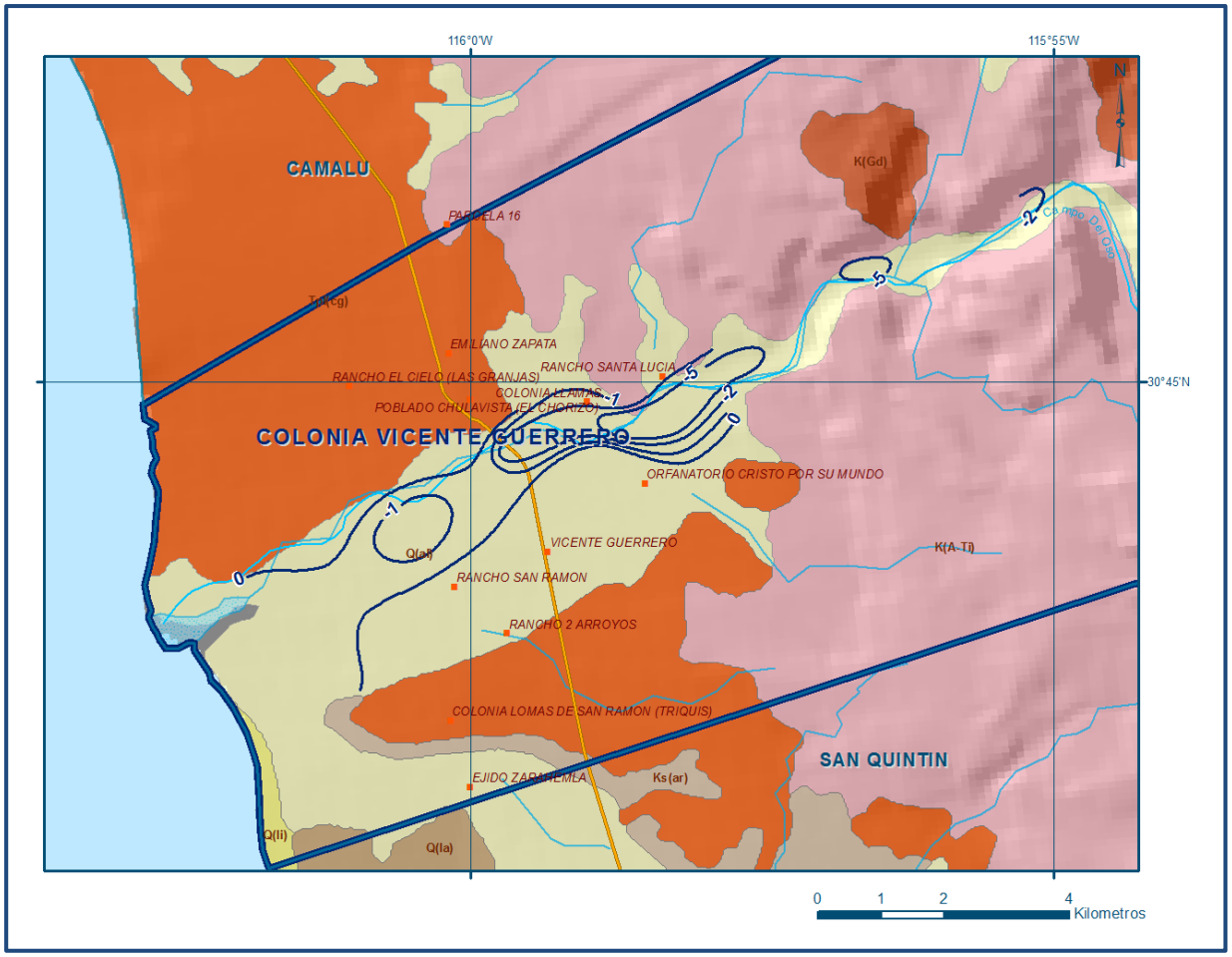


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2008-2013)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo de los estudios realizados en 2013, se tomaron 7 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyen parámetros fisicoquímicos, iones principales y menores, conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno (pH), dureza y sólidos totales disueltos (STD).

De los resultados de análisis fisicoquímicos se determina que los valores de concentración de STD varían de 2146 a 5,520 mg/l. Todas las muestras presentan concentraciones de STD mayores a 1000 mg/l que establece la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022, así como de también los límites máximos permisibles de las concentraciones de sodio y cloruro.

En cuanto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica como salobre a marina, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de manera general de 3000 a 13,000 ⌈S/cm. Los mayores valores de concentración de STD y de conductividad eléctrica se registran en la zona costera en donde de manera incidental se produce una mezcla con el agua salobre; las menores se localizan hacia las zonas de recarga que se ubican en la porción oriental del acuífero. Ambos valores se incrementan gradualmente desde la porción oriental del acuífero hacia la zona costera, en la dirección del escurrimiento superficial del arroyo Santo Domingo.

También se realizaron perfiles de salinidad en 20 aprovechamientos ubicados en distintas zonas del acuífero. La interpretación de ellos indica que en los pozos ubicados en la franja costera a partir de los 10 m de profundidad, el agua presenta conductividad eléctrica mayor 10,000 ⌈S/cm. Las variaciones de la conductividad eléctrica, están relacionadas con la ubicación espacial de los sitios con respecto al frente salino. Los sitios más cercanos a la costa son los que presentan mayores valores de conductividad y los más cercanos a las zonas de recarga registran menores valores y menor cambio con respecto a la profundidad, salvo el caso de los pozos que extraían agua para abastecimiento de agua potable, los cuales debido a la extracción intensiva ocasionaron el ascenso del agua marina.

Con respecto a la familia de agua predominante, de acuerdo con los iones presentes, predomina la familia sódica-clorurada

Además de la contaminación por intrusión marina, aunque actualmente el acuífero no está contaminado por organismos patógenos, presenta un riesgo potencial a la contaminación por actividades antropogénicas como la agricultura que utiliza agroquímicos, pesticidas y fertilizantes o de los asentamientos humanos que generan aguas residuales.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el censo realizado en el 2013, se registró la existencia de 482 aprovechamientos del agua subterránea, 336 pozos y 146 norias. Del total de obras, 232 están activas y 250 se consideran inactivas.

De los aprovechamientos activos, 188 son para uso agrícola; 21 para uso público-urbano y 23 para usos doméstico-pecuario y otros. El volumen estimado de extracción fue parcial debido a que no existe información confiable del volumen extraído para uso público-urbano.

El volumen de extracción total es del orden de los **16.2 hm^3 anuales**, incluidos 2.2 hm^3 anuales de agua salobre que reciben tratamiento en plantas desalinizadoras para su posterior uso en cultivos, de los cuales 14.6 hm^3 (90.1%) son para uso agrícola y 1.3 hm^3 (8.0%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región y 0.3 hm^3 (1.9%) para uso doméstico-pecuario.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2006 a 2013, en una superficie de **18.2 km^2**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de masa

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de un acuífero:

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Ehd). Adicionalmente, debido a la intrusión marina, existe ingreso de agua salobre (Ehs) procedente de la franja costera.

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del riego agrícola (Rr), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, y de las fugas en la red de agua potable y alcantarillado, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Debido a que el riego agrícola es tecnificado y el volumen de agua para uso público-urbano es pequeño, para fines del balance se considera que no existe recarga incidental.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance definida por la expresión:

$$Rv + Ehd + Ehs - B - Sh - Ssb = \pm \Delta V(S) \qquad (1)$$

Donde:

Rv: Recarga vertical
Ehd: Entradas por flujo subterráneo horizontal (agua dulce)
Ehs: Entradas por flujo subterráneo horizontal salobre (agua salobre)
B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal (agua dulce)
Ssb: Extracción de agua salobre
ΔV(S): Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$Rv = B + Sh + Ssb - Ehd - Ehs \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (agua dulce Ehd)

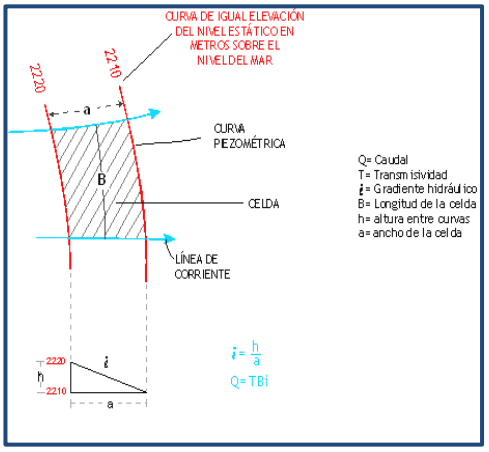
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, mostrada en la figura 5. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Donde:
Q = Caudal (m^3/s)
T = Transmisividad (m^2/s)
B = Longitud de la celda (m)
i = Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal de agua dulce es la suma de los caudales de cada celda establecida (tabla 2). El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **8.1 hm^3/año**.

Tabla 2. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua dulce (2013)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN (hm^3/año)
E1	455	205	5	0.02439	0.0020	0.0222	0.7
E2	500	200	5	0.02500	0.0020	0.0250	0.8
E3	700	350	5	0.01429	0.0020	0.0200	0.6
E4	1110	370	5	0.01351	0.0020	0.0300	0.9
E5	390	270	5	0.01852	0.0020	0.0144	0.5
E6	530	135	5	0.03704	0.0020	0.0393	1.2
E7	330	260	5	0.01923	0.0020	0.0127	0.4
E8	1140	240	5	0.02083	0.0020	0.0475	1.5
E9	1105	350	5	0.01429	0.0020	0.0316	1.0
E10	390	505	5	0.00990	0.0020	0.0077	0.2
E11	390	680	5	0.00735	0.0020	0.0057	0.2
E12	274	770	5	0.00649	0.0020	0.0036	0.1
						TOTAL	**8.1**

Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio llevado a cabo en 2013 y otros previos, adaptados al espesor saturado.

7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (Ehs)

Las entradas de agua salobre, por flujo subterráneo horizontal, fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas de agua dulce, a partir de la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 5; considerando un valor promedio de transmisividad mayor hacia la línea de costa.

El volumen total de entradas de agua salobre por flujo subterráneo horizontal es de **1.1 hm^3/año** (tabla 3).

Tabla 3. Entradas por flujo subterráneo horizontal (agua salobre) (2013)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN (hm^3/año)
Es1	855	735	1	0.00136	0.0110	0.0128	0.4
Es2	830	835	1	0.00120	0.0110	0.0109	0.3
Es3	820	800	1	0.00125	0.0110	0.0113	0.4
						Total entradas	**1.1**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo de agua dulce (B), salidas subterráneas aún de agua dulce hacia el mar (Sh) y como extracción de agua salobre por bombeo (Ssb).

7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático del 2013, mostrada en la figura 5. En la tabla 4 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **1.1 hm³/año.**

Tabla 4. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2013)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN (hm^3/año)
S1	355	1135	5	0.00441	0.0040	0.0063	0.2
S2	370	1440	5	0.00347	0.0040	0.0051	0.2
S3	635	1435	5	0.00348	0.0040	0.0089	0.3
S4	1120	1560	5	0.00321	0.0040	0.0144	0.5
						Total entradas	**1.1**

7.2.2 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen calculado de extracción es de **16.2 hm³/año**, de los cuales 2.2 hm^3 anuales son de agua salobre.

7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2008-2013 (figura 6).

Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy de 0.15, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

ΔVS: Cambio de almacenamiento en el período analizado
S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
A: Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km^2)
h: Valor de la variación piezométrica en el período (m)

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -3.2 hm^3**,** por lo que el promedio anual es de **– 0.6 hm^3.**

Por lo tanto **ΔV(S)= - 0.6 hm^3/año.**

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2008- 2013)

Abatimiento medio (m)	Área (km^2)	Sy	ΔV(S) (hm^3/año)
-5.0	1.3	0.15	-1.0
-3.5	2.8	0.15	-1.5
-1.5	1.3	0.15	-0.3
-1.0	0.8	0.15	-0.1
-0.5	4.1	0.15	-0.3
0.0	7.8	0.15	0.0
TOTAL	**18.1**	**TOTAL**	**-3.2**
	Promedio anual		**-0.6**

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia, mediante la expresión (2), establecida anteriormente:

$$\mathbf{Rv = B + Sh + - Eh - Ehs \pm \Delta V(S)}$$

$$Rv = 16.2 + 1.1 - 8.1 - 1.1 - 0.6$$

$$\mathbf{Rv = 7.5\ hm^3}$$

Por lo tanto la recarga total es:

$$\mathbf{R = Rv + Eh}$$

$$R = 7.5 + 8.1$$

$$\mathbf{R = 15.6\ hm^3/año}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA DEL SUBSUELO EN UN ACUÍFERO	=	RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL	-	DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA	-	EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
R = Recarga total media anual
DNC = Descarga natural comprometida
VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **15.6 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

En este caso, su valor es de 1.1 hm^3 anuales que corresponden a las salidas subterráneas de agua dulce que ocurren aún hacia la cota de elevación cero msnm, para prevenir mayor migración de agua salobre. **DNC = 1.1 hm³ anuales.**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA).

Los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **40,634,311 m^3 anuales,** que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022.**

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

DMA = R – DNC – VEAS

DMA = 15.6 – 1.1 – 40.634311

DMA = -26.134311 hm^3/año.

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **26,134,311 m^3 anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2007. Plan de manejo integrado de las aguas subterráneas en el acuífero de la Colonia Vicente Guerrero, estado de Baja California. Elaborado por la Universidad Autónoma de Baja California.

Comisión Nacional del Agua, 2013. Estudio Geohidrológico para la Reglamentación de los Acuíferos Guadalupe y Colonia Vicente Guerrero, en el estado de Baja California. Realizado por Lesser y Asociados, S.A. de C.V:

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1978. Geohidrología del Valle de Vicente Guerrero, B.C.N. Realizado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A